

pliqués, ou tenter de deviner en presque aveugles ces secrets qui, pour la nature elle-même, vont de soi. »

Ce compagnonnage se prolonge dans les réalisations expérimentales qui confirment la réalité des surprises que l'esprit a quelques difficultés à entrevoir.

La visite de la Sainte Chapelle

« Ces surprises jubilatoires face à l'univers quantique se retrouvent lors de l'enseignement de cette discipline. La marche d'approche n'est certes pas des plus aisées : si l'apprentissage d'une théorie physique peut se comparer à la découverte d'un monument, celui de la mécanique quantique ressemble davantage à la visite de la Sainte Chapelle qu'à celle du château de Versailles. On ne découvre ses richesses qu'après avoir traversé des cours étroites et des salles basses. Mais une fois sur place, les élèves se piquent au jeu et rivalisent d'inventivité pour trouver de nouveaux tours, tentant de déterminer furtivement si la particule est à droite ou à gauche, voire de téléporter leurs camarades » remarque Jean Dalibard.

La physique expérimentale a ses réalités. Juliette Simonet a illustré cette tâche par le maniement de l'outil : « Aujourd'hui je suis en dernière année de thèse et je manie beaucoup la clé de 13 (par exemple pour changer une pompe).... L'expérimentation a un impact important sur la théorie, non seulement pour la vérifier, mais aussi pour simuler au laboratoire des problèmes non solubles numériquement. »

Pour quoi faire ?

La physique fondamentale crée ses propres instruments d'action. Écoutez Christian Bordé : « La mécanique quantique reste encore bien mystérieuse, mais elle envahit peu à peu notre échelle humaine grâce à cette métrologie quantique en plein développement. À un bout de la chaîne ces recherches sont enracinées dans l'héritage de De Broglie et d'Einstein. À l'autre, elles conduisent à de nouveaux outils pour l'exploration du monde et pas seulement sur terre car, à en juger par la multiplication des projets de missions spatiales qui les proposent, leur avenir est aussi dans l'espace. »

L'IFFRAF est un réseau de 33 équipes de recherche toutes associées au CNRS et réparties sur différents établissements : l'École normale supérieure, l'Observatoire de Paris, l'Institut d'Optique et les universités UPMC, Paris-Sud 11 et Paris-Nord 13. L'IFFRAF a également associé 8 équipes situées dans d'autres établissements. Son siège est à l'École normale supérieure, 45 rue d'Ulm, 75 231, Paris, Cedex 05.

Contact : leduc@lkb.ens.fr.

Les recherches à l'IFFRAF regroupent trois axes scientifiques :

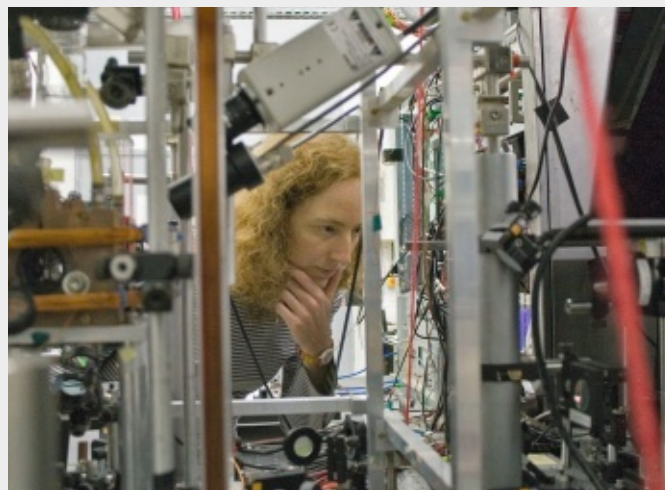
- Les gaz quantiques et les comportements collectifs dans les condensats de Bose-Einstein. Les atomes froids, bosons ou fermions, placés dans des potentiels optiques périodiques forment des systèmes modèles pour mieux comprendre la matière condensée. Ces études s'étendent aux molécules froides.
- La métrologie de précision. L'utilisation des atomes froids fait gagner plusieurs ordres de grandeur sur la précision des horloges, des gyro-mètres, des gravimètres et des capteurs inertiels pour le positionnement et la navigation. La miniaturisation sur des puces à atomes est en cours.
- L'information quantique. Les atomes froids isolés et piégés en petit nombre permettent d'envisager de nouveaux dispositifs fondés sur l'intrication entre particules (atome/atome ou atome /photon) destinés au stockage de l'information ou à la cryptographie quantique.

Dans les horloges atomiques « chefs-d'œuvre quantiques », le temps est mesuré comme l'inverse d'une fréquence, laquelle est elle-même liée à l'énergie de transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome. Ces horloges, toujours perfectionnées, sont les plus précises du monde (une seconde sur 100 millions d'années) et servent à la définition de la seconde. Pour Noël Dimarcq « Le spectre d'applications des horloges atomiques est extrêmement large. La synchronisation d'horloges est essentielle aux réseaux de télécommunications, aux observations astronomiques par les systèmes d'interférométrie à longue base ou à la navigation des sondes dans le Système solaire.

Cette amélioration des mesures viendra peut-être un jour contrarier des précisions supposées infaillibles. Tout physicien rêve de vivre une telle révolution associant l'amertume de la théorie abandonnée à l'excitation des domaines à découvrir. »



Yvan Castin, Michèle Leduc, David Guéry-Odelin, Claude Cohen-Tannoudji



Hélène Perrin s'interrogeant sur la marche de l'expérience

LA QUÊTE D'UNE THÉORIE unifiée des interactions

Monsieur Unification Entretien avec Steven Weinberg, page 62 • **L'insaisissable théorie unifiée** par Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, page 65 • **Une théorie géométrique du Tout** par Garrett Lisi et James Weatherall, page 68

Pour décrire et comprendre les phénomènes de la nature, les physiciens ont toujours recherché des lois générales et reposant sur le plus petit nombre de principes possible. Cette démarche est particulièrement flagrante en physique des particules, où la quête d'une théorie unificatrice est entamée depuis les années 1930 au moins.

Quatre interactions fondamentales ont été identifiées dans la nature : la gravitation, la force électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte, ces deux dernières n'agissant qu'à l'échelle des noyaux atomiques et en deçà. La théorie classique de l'électromagnétisme, œuvre de James Clerk Maxwell vers 1865, est elle-même une théorie [classique] qui unifie l'électricité et le magnétisme. Mais l'étape suivante dans l'unification des interactions fondamentales n'a été franchie qu'autour des années 1970, avec la théorie électrofaible, une œuvre collective de longue haleine pour laquelle trois de ses principaux protagonistes, Steven Weinberg, Abdus Salam et Sheldon Glashow ont été récompensés par le prix Nobel en 1979.

La théorie électrofaible réunit l'interaction électromagnétique et l'interaction faible en un seul édifice, une théorie quantique des champs fondée sur d'élégants principes de symétrie. Sa confirmation expérimentale la plus spectaculaire a été la découverte au CERN, en 1982 et 1983, des bosons W et Z prédits par la théorie. Une autre particule clef de la théorie électrofaible est le boson de Higgs, inobservé à ce jour, mais que l'on espère bien détecter prochainement grâce au collisionneur LHC du CERN, entré en fonction il y a huit mois.

Dans les années 1970 également, une théorie cohérente de l'interaction forte, fondée sur les mêmes principes de symétrie que la théorie électrofaible, a vu le jour, sous le nom de chromodynamique quantique. La juxtaposition de la théorie électrofaible et de la chromodynamique quan-

tique constitue le «modèle standard» de la physique des particules.

Ce modèle est une théorie quantique qui n'intègre pas la quatrième interaction fondamentale, la gravitation, décrite par la relativité générale d'Einstein – une théorie non quantique. Les physiciens en quête d'unification sont ainsi confrontés à plusieurs défis apparentés : construire une théorie quantique de la gravitation, réunir la gravitation avec les trois autres interactions, aller au-delà du modèle standard pour éliminer les parts d'ombre et d'arbitraire qu'il contient.

Malgré des décennies de recherche, le chantier de l'unification reste inachevé. Le dossier que nous publions présente trois regards différents sur la question. Steven Weinberg nous rappelle dans un entretien les enjeux, les difficultés et les pistes existantes, selon lui.

Dans le deuxième article, Stephen Hawking et Leonard Mlodinow attirent notre attention, au travers de l'état actuel de la « théorie des cordes », sur le fait que la théorie unifiée tant recherchée est peut-être une utopie : plusieurs édifices complémentaires et en partie distincts pourraient être nécessaires.

Enfin, dans le troisième article, Garrett Lisi et James Weatherall présentent – en utilisant le langage des « fibrés » plutôt que le langage habituel de la théorie des groupes de symétrie – une voie de recherche qui s'appuie sur les mêmes principes géométriques que la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique. G. Lisi, physicien extérieur au milieu scientifique professionnel, a été très médiatisé en 2007 en publiant sur Internet une ébauche de théorie unificatrice fondée sur un groupe noté E_8 . Ses travaux laissent toujours sceptiques la plupart des spécialistes. Mais même si ces idées se révèlent un jour non pertinentes, son article a le mérite de bien retracer la série de tentatives qui ont été faites pour étendre le modèle standard.

Monsieur Unification

La construction d'une théorie unifiant les interactions fondamentales de la physique est un chantier ouvert depuis des décennies. Steven Weinberg est l'un de ses principaux protagonistes.

Entretien avec Steven Weinberg

→ Le collisionneur LHC, au CERN, suscite beaucoup d'espoirs. Certains ont comparé les résultats attendus avec les révolutions quantique et relativiste du premier tiers du XX^e siècle. Qu'en pensez-vous ?

→ Steven Weinberg

On peut imaginer que ces résultats vont conduire à une révolution de notre pensée en physique comparable à celle du début du XX^e siècle, mais ce n'est pas une certitude. Pour qu'une telle révolution se produise, il faut qu'arrive quelque chose de complètement imprévu... que je ne peux donc pas prévoir !

À court terme, nous essayons d'avancer au-delà du modèle standard, et aussi d'imaginer ce qui s'est passé aux débuts de l'Univers. Cela prendra du temps. Nous espérons ensuite pouvoir tout relier, et disposer enfin d'une théorie rendant compte de toutes les particules et de toutes leurs interactions. Nous ignorons à quoi elle ressemblera.

Quand nous aurons une compréhension vraiment complète de la nature au niveau le plus fondamental, elle diffusera dans la société. Elle sera probablement très mathématique, et le grand public mettra longtemps à comprendre, comme il a fallu longtemps avant que les scientifiques eux-mêmes comprennent la théorie de Newton. Mais cette dernière a finalement eu une profonde influence sur la façon dont les gens en général conçoivent le monde et la vie humaine. Elle a eu des répercussions sur l'économie, la biologie, la politique et la religion. Une situation semblable pourrait se produire si

nous parvenons à une théorie vraiment complète de la nature.

Notre représentation de la nature se fait de plus en plus globale, et des énigmes d'autrefois, comme la nature des forces qui assurent la cohésion des particules au sein d'un atome, ont été parfaitement comprises – pour être aussitôt remplacées par de nouvelles énigmes, telle l'origine des propriétés des particules élémentaires, particules du modèle standard. Et le processus par lequel on explique des énigmes tout en en suscitant de nouvelles se poursuivra longtemps. Ce n'est qu'une supposition, mais je pense que nous parviendrons à un point où il n'y aura plus le même genre d'énigmes. Et ce sera alors un remarquable tournant dans l'histoire de la pensée.

→ La découverte du boson de Higgs est le premier grand objectif poursuivi au LHC, à supposer que les physiciens du Tevatron, au Fermilab, ne le trouvent pas en premier. Dans quelle mesure l'unification électrofaible et le modèle standard dépendent-ils du boson de Higgs ?

→ Steven Weinberg

Le modèle standard repose complètement sur l'existence d'une brisure de la symétrie électrofaible. Mais si vous vous demandez pourquoi la symétrie est brisée, le doute est permis. Le mécanisme de brisure de symétrie mis en œuvre dans le modèle de Weinberg-Salam (le secteur électrofaible du modèle standard) requiert l'existence d'une nouvelle particule, qui a pris le nom de boson de Higgs. Ce modèle simple a conduit à la pré-

diction du rapport des masses des bosons faibles, prédiction qui semble très bonne.

Pour autant, une autre possibilité existe : que la symétrie soit brisée par des interactions fortes d'un type nouveau, de façon qu'il n'y ait pas de boson de Higgs. Ces nouvelles interactions devraient être bien plus fortes que l'interaction forte ordinaire. Lenny Susskind et moi avons, indépendamment, mis au point une théorie sur ce principe que nous avons d'un commun accord nommée Technicouleur. Elle prédit bien elle aussi les masses des bosons faibles, mais peine à expliquer les masses des quarks. Certains théoriciens continuent de travailler sur la Technicouleur. Si cette théorie est pertinente, le LHC devrait la mettre en évidence, ainsi que tout un ensemble de particules nouvelles.

Ainsi, même si le LHC ne trouve pas le boson de Higgs, il se peut que ce collisionneur trouve autre chose d'équivalent, par exemple des indices de la validité de la Technicouleur. De fait, on montre que sans particules nouvelles, on a des incohérences mathématiques.

→ Un autre principe que les physiciens espèrent confirmer au LHC est la supersymétrie, l'idée selon laquelle les particules médiatrices des interactions, tels les bosons faibles, et les particules de matière, telles que les électrons et les quarks, sont intimement reliées. Certains physiciens ont autant confiance dans la supersymétrie qu'Einstein en avait dans la relativité : elle est si convaincante qu'elle ne peut qu'être vraie. Est-ce aussi ce que vous ressentez ?